

Entwicklung eines kognitionsergonomischen Konzeptes und eines Simulationssystems für die robotergestützte Montage

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Marcel Philipp Mayer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Marc Schlick
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Holger Luczak

Tag der mündlichen Prüfung: 27. August 2012

Industrial Engineering and Ergonomics

Band 12

Marcel Philipp Mayer

**Entwicklung eines kognitionsergonomischen
Konzeptes und eines Simulationssystems für die
robotergestützte Montage**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1445-7

ISSN 1865-4665

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Recht herzlich möchte ich mich für die Betreuung meiner Promotion sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Marc Schlick, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt und Herrn Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Holger Luczak bedanken. Der großzügig gewährte Freiraum sowie die unzähligen fachlichen als auch überfachlichen Gespräche und Diskussionen, welche die vorliegende Schrift zweifelsohne bereichert haben, ermöglichten es mir erst, dieses Promotionsvorhaben durchzuführen.

Besonderen Dank möchte ich meiner lieben Kollegin Frau Dipl.-Ing. Barbara Odenthal sowie meiner langjährigen studentischen Hilfskraft und heutigem Kollegen Herrn Dipl.-Inform. Marco Faber aussprechen, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und mich somit in meinen Ideen bestärkt haben. Für die Entlastung insbesondere von administrativen Aufgaben und mentale Unterstützung in der Endphase meiner Promotion möchte ich meiner lieben Oberingenieurkollegin Frau Dr.-Ing. Susanne Mütze-Niewöhner danken. Darüber hinaus gilt mein Dank allen heutigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, die zu dem angenehmen und durchweg positiven Arbeitsklima am IAW beigetragen und mich so ein Stück des Weges begleitet haben.

Speziell meinen Eltern, die mich Zeit meines Lebens unterstützt und ermutigt haben, den beschrittenen Weg zu gehen, gebührt hier besonderer Dank. Insbesondere die vielen Gespräche über die Jahre in Charlotte als auch die Zeit in Klausur in Dennach haben mir sehr geholfen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner geliebten kleinen Familie, meinem Sohn Hendrik und meiner wundervollen Frau und besten Freundin Anja, für das Verständnis, den bedingungslosen Rückhalt und den unbeugsamen Glauben an mich danken, welche letztendlich das Fundament zum Gelingen dieser Schrift darstellen. Ihnen möchte ich dieses Buch widmen.

Vorwort

Produzierende Unternehmen werden in Deutschland in besonderem Maße durch globale Entwicklungen beeinflusst. Sie müssen durch eine nachhaltige Steigerung ihrer Wertschöpfungsprozesse versuchen, sowohl ihre internationale Wettbewerbsposition zu verbessern als auch ihre heimischen Standorte im Hinblick auf Produktivität und Qualität zu stärken, um die Verlagerung der Fertigungs- und Montagestätten ins Ausland vermeiden zu können. Hier stellt sich nun die Frage wie diese Unternehmen ihre Wertschöpfung nachhaltig steigern können, ohne die dazu notwendigen Planungsaufwände in Relation zu den direkt wertschöpfenden Tätigkeiten überproportional ansteigen zu lassen. Vergleichbares gilt für eine flexible Anpassung an individuelle Kundenwünsche bei gleichzeitig kostengünstiger (Massen-) Produktion. Eine Antwort auf diese Fragestellungen findet sich u.a. im Bereich selbstoptimierender Produktionssysteme. Diese sind in der Lage, Produktionsziele wie auch einzelne Produktionsfolgen während der Fertigung und Montage situationsabhängig adaptieren zu können.

Die Fähigkeit eines technischen Systems zu entscheiden, welche Anteile einer gegebenen Aufgabe durch bestimmte Akteure und Funktionen unter bestimmten Ausführungsbedingungen mit spezifischen Werkzeugen ausgeführt werden können, kann als situiertes Verhalten bezeichnet werden. Um die Funktionen eines Produktionssystems diesbezüglich zu erweitern, müssen kognitive Fähigkeiten des Menschen wie Problemlösen oder Entscheiden modelliert, simuliert und in heutige Systeme integriert werden. Dadurch ändert sich die Rolle des menschlichen Operators im Sinne des sog. Supervisory-Control-Paradigmas nach Sheridan ganz erheblich. Benutzerzentrierte Automatisierungsansätze – wie die von Billings – welche eine ständige Intervention des Benutzers fordern, sind nur bedingt anwendbar. Daher wird als zentrale Anforderung an die benutzerzentrierte Gestaltung selbstoptimierender Produktionssysteme die kognitive Kompatibilität zwischen Mensch und Maschine gestellt, d.h. dass das Prozesswissen des Systems an das mentale Modell des Benutzers angepasst werden muss.

Ausgehend von einem menschenzentrierten Automatisierungsansatz erfolgt in der vorliegenden Schrift auf der Grundlage der kognitiven Architektur SOAR ein systematischer Wechsel zwischen Simulationsstudien zur Validierung der entwickelten kognitiven Simulationsmodelle und Laboruntersuchungen zur Erhebung von zusätzlichen Heuristiken zur Verbesserung der Sequenzplanung sowie der Überprüfung der Konformität von Erwartungshaltung und Systemverhalten. Die Zielsetzung ist hierbei, auch bei variantenreicher Montage die Bildung eines mentalen Modells durch eine an menschlichen Bewegungszyklen orientierte Beschreibung der Prozesse zu unterstützen und somit die Mensch-Roboter-Interaktion innerhalb eines kognitiv automatisierten Montagesystems sicherer und effizienter zu gestalten. Durch die

sukzessive Erweiterung der Wissensbasis dieses Systems konnte für die Montage einfacher kubischer Elemente eine signifikante Erhöhung der Erwartungskonformität erreicht werden.

Die vorliegende Schrift stellt somit einen ersten Schritt auf dem Weg zu selbstoptimierenden Produktionssystemen dar, die auf eine kognitionsergonomische Kooperation von Mensch und Maschine abzielen. Die Ergebnisse zeigen, dass dem Menschen mit seinen überragenden kognitiven, perzeptiven und sensomotorischen Fähigkeiten im Optimierungsprozess für die zielgerichtete Systemrekonfiguration eine besondere Rolle mit ausgeprägten Entscheidungsspielräumen zukommt und die Mensch-Maschine-Interaktion durch kognitive Simulationsmodelle hinsichtlich Leistung, Zuverlässigkeit und Beanspruchung deutlich verbessert werden kann.

Christopher M. Schlick

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Winkelholz C, Schlick C (2012) Cognitive Engineering of Automated Assembly Processes. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*. DOI: 10.1002/hfm.20390
- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Schlick C (2012) Cognitively automated assembly processes: a simulation based evaluation of performance. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation* 41(Supplement 1):3449-3454
- Mayer M, Odenthal B, Ewert D, Kempf T, Behnen D, Büscher C, Kuz S, Müller S, Hauck E, Kausch B, Schilberg D, Herfs W, Schlick CM, Jeschke S, Brecher C (2011) Selbstoptimierende Montagesysteme auf Basis kognitiver Technologien. In: Brecher C (Hrsg) *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Springer, Berlin
- Mayer M, Schlick C, Ewert D, Behnen D, Kuz S, Odenthal B, Kausch B (2011) Automation of robotic assembly processes on the basis of an architecture of human cognition. In: *Production Engineering Research and Development* 5(4):423-431
- Schlick C, Mayer M, Jeske T, Kausch B, Kuz S, Odenthal B, Mütze-Niewöhner S (2011) Ergonomische Gestaltung einer kognitiven Planungs- und Steuerungseinheit. In: Eversheim W, Pfeifer T, Weck M, Brecher C, Klocke F, Schuh G (Hrsg) *Selbstoptimierende Produktionssysteme - Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt*. WZL RWTH Aachen, Aachen, S 35-69
- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Kabuß W, Jochems N, Schlick C (2010) Simulation menschlicher Kognition in selbstoptimierenden Montagesystemen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V (Hrsg) *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*, 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 24.- 26. März 2010. GfA-Press, Dortmund, S 185-188
- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Kabuß W, Jochems N, Schlick C (2010) Cognitive Engineering for Self-Optimizing Assembly Systems. In: Karwowski W, Salvendy G (Hrsg) *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries*. Taylor & Francis, Boca Raton
- Odenthal B, Mayer M, Jochems N, Schlick C (2010) Cognitive Engineering for Human-Robot Interaction - The Effect of Subassemblies on Assembly Strategies. In: Karwowski W, Salvendy G (Hrsg) *Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries*. Taylor & Francis, Boca Raton
- Schlick C, Mayer M, Odenthal B (2010) MTM als Prozesslogik für die kognitiv automatisierte Montage. In: Britzke B (Hrsg) *MTM in einer globalisierten Wirtschaft - Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren*. *mi-Wirtschaftsbuch*, München 2010, S 183-199, 375-377
- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Kabuß W, Kausch B, Schlick C (2009) Simulationsgestützte Prozessplanung für die flexible Mensch-Roboter-Kooperation. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg) *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert, Bericht zum 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 4.- 6. März 2009*. GfA-Press, Dortmund 2009, 117-120

- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Kabuß W, Kausch B, Schlick C (2009) Simulation of Human Cognition in Self-Optimizing Assembly Systems. In: Proceedings of 17th World Congress on Ergonomics IEA2009. Beijing
- Mayer M, Odenthal B, Faber M, Neuhöfer J, Kabuß W, Kausch B, Schlick C (2009) Cognitive Engineering for Direct Human-Robot Cooperation in Self-Optimizing Assembly Cells. In: Kurosu M (Hrsg) Human Centered Design, Lecture Notes in Computer Science 5619. Springer, Heidelberg, S 1003-1012
- Schlick C, Odenthal B, Mayer M, Neuhöfer J, Grandt M, Kausch B, Mütze-Niewöhner S (2009): Design and Evaluation of an Augmented Vision System for Self-Optimizing Assembly Cells. In: Schlick C (Hrsg) Industrial Engineering and Ergonomics - Visions, Concepts, Methods and Tools - Festschrift in Honor of Professor Holger Luczak. Springer, Berlin, S 539-560
- Mayer M, Odenthal B, Grandt M, Schlick C (2008) Anforderungen an die benutzerzentrierte Gestaltung einer Kognitiven Steuerung für Selbstoptimierende Produktionssysteme. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg) Produkt- und Produktions-Ergonomie - Aufgabe für Entwickler und Planer, Bericht zum 54. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 9.-11. April 2008 an der Technischen Universität München. GfA-Press, Dortmund, S 203-206
- Mayer M, Odenthal B, Grandt M, Schlick C (2008) Task-Oriented Process Planning for Cognitive Production Systems using MTM. In: Karwowski W, Salvendy G (Hrsg) Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomic (AHFE) 14.-17. July 2008. USA Publishing, Las Vegas, S 1-9
- Schlick C, Odenthal B, Mayer M, Neuhöfer J, Kausch B, Mütze-Niewöhner S (2008) Mensch-Maschine-Interaktion in selbstoptimierenden Produktionssystemen. In: Scholz-Reiter B (Hrsg) Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). GITO-Verlag, Berlin, 2008 S 217-236

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Vorgehensweise.....	5
2	Grundlagen.....	9
2.1	Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer.....	9
2.1.1	Ausgangssituation	9
2.1.2	Lösungshypothesen und -konzepte	10
2.1.3	Selbstoptimierende Produktionssysteme im Detail	15
2.2	Systemmodelle für selbstoptimierende Produktionssysteme	20
2.2.1	Arbeitssystemmodell.....	25
2.2.2	Überwachende Prozessführung	29
2.2.3	Anforderungen an ein kognitionsergonomisches Konzept für selbstoptimierende Produktionssysteme.....	36
2.3	Automatisierung auf Basis kognitiver Architekturen	42
2.3.1	Begriffliche Grundlagen.....	42
2.3.2	Automatisierungskonzepte	49
2.3.3	Softwarearchitektur für kognitiv automatisierte Systeme	54
2.3.4	Kognitive Architekturen.....	57
2.3.4.1	ACT-R	58
2.3.4.2	ICARUS.....	59
2.3.4.3	SOAR.....	60
2.4	Zusammenfassung.....	62
3	Entwicklung eines menschenzentrierten kognitiven Automatisierungsansatzes für die Montage.....	65
3.1	Referenzmodell der kognitiven Simulation	66
3.1.1	Modellentwicklung	66
3.1.2	Simulationsumgebung.....	84
3.1.3	Verifikationsstudie	88
3.1.4	Ergebnisse	90
3.1.5	Diskussion.....	112
3.2	Empirische Analyse von Montagetätigkeiten zur Erweiterung des Referenzmodells	116
3.2.1	Erhebung von Montageheuristiken	116
3.2.1.1	Methodik.....	116
3.2.1.2	Ergebnisse.....	117

3.2.2	Validierung von Montageheuristiken.....	118
3.2.2.1	Methodik.....	118
3.2.2.2	Ergebnisse.....	121
3.2.3	Einfluss von visuell separierbaren Baugruppen auf die Montageheuristiken.....	122
3.2.3.1	Methodik.....	122
3.2.3.2	Ergebnisse.....	126
3.2.4	Diskussion.....	129
3.3	Simulationsstudie zur Bewertung prädiktiver Validität von Regelsätzen zur Erweiterung des Referenzmodells.....	130
3.3.1	Randbedingungen für die Simulation.....	133
3.3.2	Komparative Simulationsstudie.....	137
3.3.3	Ergebnisse.....	139
3.3.4	Diskussion.....	142
3.4	Prädiktionsversuche zur Überprüfung der kognitiven Kompatibilität der kognitiven Simulationsmodelle.....	144
3.4.1	Methodik.....	144
3.4.2	Exkurs: Erweiterung des Scheirer-Ray-Hare Test auf messwiederholte Designs.....	151
3.4.3	Ergebnisse.....	157
3.4.4	Diskussion.....	166
4	Übertragung auf andere Bauzusammenhänge.....	171
4.1	Anwendungsszenario.....	171
4.2	Kognitive Simulation.....	173
4.2.1	Methodik.....	173
4.2.2	Ergebnisse und Diskussion.....	174
4.3	Laboruntersuchungen.....	178
4.3.1	Methodik.....	178
4.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	179
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	183
	Literaturverzeichnis.....	189
	Anhang.....	201
	Fragebögen.....	201
	Anweisungen.....	203